

Semantische Verknüpfung von Informationsmodellen für Maschinen und Anlagen

Ein Systemmodell für die technische Dokumentation

M. Stolze, Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg;

Prof. Dr.-Ing. **M. Barth**, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT);

Prof. Dr.-Ing. **C. Diedrich**, Otto von Guericke Universität, Magdeburg

Kurzfassung

Die technische Dokumentation bildet eine substanzielle Basis für den sicheren und bestimmungsgemäßen Umgang mit einer Produktionsanlage. Sie wird im Laufe des Engineerings, d. h. in der Planung, Konstruktion, Errichtung und Inbetriebnahme als auch während des Betriebs selbst bis hin zum Rückbau erzeugt, aktualisiert und verwendet. Die zunehmende Komplexität von Produktionsanlagen sowie ihrer Informationsmengen und der Art, wie die Artefakte und Dokumente in der technischen Dokumentation bzgl. Format und Speicherort abgelegt werden, stellen bis heute eine Hürde für die schnelle Extrahierung konsistenter menschenzentrierter Informationen dar. Die vorliegende Arbeit geht zunächst auf die Herausforderungen in Bezug auf die Bedienung, Wartung und Instandhaltung einer Anlage ein, welche der gegenwärtige Zustand der technischen Dokumentation mit sich bringt. Anhand eines Praxisbeispiels beschreiben die Autoren erste Konzepte einer laufenden Forschungsarbeit, welche die bisher größtenteils starre technische Dokumentation mehr in den Fokus der Industrie 4.0 rücken und letztendlich zu einem informationstechnisch und algorithmisch anwendbaren Artefakt wandeln will.

Abstract

The technical documentation constitutes a substantial base to ensure the use of production systems safely and as intended. It is created, updated and used in the engineering phase, e.g., in planning, construction, design and commissioning as well as during the operation phase until decommissioning. The complexity of production systems and the amount of information in them are increasing. Furthermore, the manner in which artefacts and documents in a technical documentation are stored, with regards to the format and location, is complicated. To date, this combination of factors represents a barrier for a rapid extraction of consistent and human centered information. To begin with, the present work depicts the challenges regarding the handling, maintenance and repair of a production system, which are brought about by the

current state of the technical documentation. Using a practical example, the authors describe the initial concepts of an ongoing research project that aims to move the largely rigid technical documentation into the focus of Industry 4.0 and ultimately transform it into an information technology and algorithmically applicable artifact.

1. Einleitung und Motivation

1.1 Informationstechnische Herausforderungen in der Maschinenwartung und -instandhaltung

Die mit der Wartung und Instandhaltung (W&I) von (Sonder-) Maschinen und Anlagen, im Folgenden als Produktionssysteme (PS) bezeichnet, betrauten Mitarbeiter müssen sich mit einer stetig steigenden Flut an heterogenen Informationen auseinandersetzen. Dies umfasst nicht zuletzt die Suche nach und Analyse von mannigfaltigen Quellen, wie z. B. Papierdokumenten, PDF, Excel-Tabellen oder relationale Datenbanken von Engineering-Tools [1], [2]. Die Gründe für die zunehmende Informationsvielfalt sind einerseits in der technologischen Komplexität der PS sowie andererseits in einer zunehmenden Variantenvielfalt (Variabilität) von miteinander verbundenen (Konnektivität) Produktionsmodulen zu suchen. Andererseits bestehen derzeitig noch Hürden in der Zusammenarbeit mehrerer Domänen mit den jeweils etablierten Softwaretools [1]. Hinzukommend benennt [3] die Schwierigkeit, dass die auf unterschiedliche Dokumente verteilten Informationen oftmals an verschiedenen Speicherorten vorliegen. Durch die unterschiedlichen Speicherorte kann es zusätzlich dazu kommen, dass Kopien eines Masterdokuments in unterschiedlichen Versionen existieren [3].

Zur Verdeutlichung der genannten Hürden soll ein beispielhafter Prozess eines Instandhalters (IH) herangezogen werden. Der IH arbeitet mit zwei weiteren IH-Kollegen in einer Produktion, die aus drei Maschinenparks besteht. Dabei unterscheiden sich sowohl die Maschinenparks als auch die PS in dem jeweiligen Maschinenpark voneinander. Einige der PS sind Serienmaschinen und andere wiederum Sondermaschinen oder Anlagen. Zu jeder der PS ist der jeweilige Produktionssystemhersteller verpflichtet, eine technische Dokumentation (TD) für den Betreiber bereitzustellen [4]. Sie bildet die Repräsentanz des Ist-Zustands eines gelieferten PS nach der Inbetriebnahme ab und liefert relevante Informationen für die W&I. Der Betreiber sorgt für die Speicherung bzw. Ablage der erhaltenen TD seines gesamten Maschinenparks. Die TD einer Anlage kann durch die getroffenen Vereinbarungen zwischen dem Produktionssystemhersteller und dem zukünftigen Betreiber, sowohl in Bezug auf Ihren Umfang als auch bezüglich der Detailtiefe, stark variieren [5]. Sie besteht aus Dokumenten unterschiedlicher Domänen. Dies sind u. a. Schaltpläne, Ablaufdiagramme, Fließschemata, Sicherheitsanalysen, Stücklisten, Prüfprotokolle, Betriebsanleitungen der verbauten

Systemelemente und schlussendlich die Betriebsanleitung des PS [6], [7]. Eine Liste mit weiteren Beispielen für Dokumentarten sind in der IEC 61355 [8] zu finden. Die TD bildet laut [6] das Herzstück für den Betreiber, da in ihr alle für den sicheren und bestimmungsgemäßen Gebrauch notwendigen Informationen dokumentiert sind und damit auch die Langlebigkeit des eingekauften PS garantiert wird.

Die Informationen aus der TD werden überwiegend mit Hilfe spezieller Engineering-Werkzeuge erstellt, was z. B. Engineeringartefakte wie Stromlaufpläne, Fließschemata, Programmablaufpläne oder CAD-Modelle betrifft. Hinter diesen Engineering-Werkzeugen steht meistens ein proprietäres Informations- oder Datenmodell. Das belegen die zahlreichen Bestrebungen, die Softwareschnittstellen von Engineering-Werkzeugen unterschiedlicher Anbieter zu standardisieren, wie [1], [9] und [10] unter anderem zeigen. Neben den Engineeringartefakten¹ gibt es aber auch Dokumente², die keinem Informationsmodell unterliegen, wie z. B. Prüfprotokolle, Checklisten oder Betriebsanleitungen. Beide Arten von Informationsrepräsentation werden im Weiteren unter dem Sammelbegriff Artefakte geführt.

Damit der Betreiber die Informationen aus der TD in seine jeweilige Softwarelandschaft integrieren kann, ist die Weitergabe einer maschineninterpretierbaren TD notwendig. Auch wenn in der Forschung bereits seit langem zielführenden Ansätze, wie beispielsweise AutomationML [11], DEXPI [12] oder die IEC 61850 existieren, so sind nach wie vor nicht genügend standardisierte Schnittstellen für die verwendeten Softwaretools in der Realität angekommen, sodass der überwiegende Teil der Engineeringartefakte in PDF-Dokumente exportiert wird [2]. Über diese informationstechnische Hürde hinausgehend beschreiben Normen, wie die DIN 6789, eine Dokumentationssystematik, in der die TD archiviert wird, um Verfälschungen auszuschließen. Dafür müssen sowohl die Artefakte in Formate wie TIFF, PDF-A oder STEP transformiert werden [13]. Diese Formate erfüllen jedoch nicht den informationsmodellhaften Anspruch, der hinsichtlich eines Einsatzes im modellbasierten Engineering und Betrieb vorhanden sein müsste.

Unter Berücksichtigung der in den vorangehenden Abschnitten erläuterten Hürden können bereits erste Herausforderungen (HF) für die Anwendung der TD von W&I-Personal abgeleitet werden:

¹ Modellbasierte interpretierbare Engineeringergebnisse (z. B. AML Modell aus ECAD)

² Für den Menschen ausdruckbare und einfach lesbare Form von Informationen

HF_1: Die TD liegt nicht oder nur teilweise maschineninterpretierbar vor und ist auf die Interpretation von Texten und Plänen durch den Menschen fokussiert.

HF_2: Bestehende Normen stellen für die Verfälschungssicherheit von TD deren Archivierung in offenen standardisierten Formaten, wie beispielsweise TIFF, STEP oder PDF-A vor.

Durch die Übergabe von PDF-Dokumenten an den Betreiber ist die TD des PS statisch und weicht laut [14] bei längerem Betrieb der Maschine von dem physischen Zustand ab, da sie manuell gepflegt werden muss. In der Praxis gilt daher auch die Aussage, dass die TD bereits kurz nach dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme, insbesondere durch die manuelle Pflege, zu altern beginnt [14]. Andererseits kann es durch die Existenz mehrerer (lokaler) Kopien vorkommen, dass Änderungen nur in einer Version vorgenommen werden [3]. Will der IH in seiner Tätigkeit nun auf eine manuell gepflegte Dokumentation einer Maschine zugreifen, kann er nicht davon ausgehen, dass diese Dokumentation konsistent mit dem aktuellen Zustand des PS ist. Dies ist jedoch zwingend der Fall, weil zum einen seine Sicherheit während der W&I-Arbeiten davon abhängen kann und zum anderen, damit die Nebenzeitz³ während seiner Tätigkeit nicht unnötig erhöht wird. Als ein Beispiel für die Wichtigkeit der Konsistenz in Bezug auf die Sicherheit im Umgang mit einem PS kann die Instandsetzung einer Baugruppe an einem Pneumatikzylinder genannt werden, der Bauteile miteinander verpresst. Bei Belegung eines optischen Sensors fährt der Pneumatikzylinder aus. In der Betriebsanleitung des PS ist der Gefahrenhinweis dokumentiert, dass Quetschungen bei unsachgemäßer Durchführung möglich sind. Vor Beginn der eigentlichen Arbeit muss daher die Lastspannung für das Wegeventil des Pneumatikzylinders freigeschaltet werden. Im zugehörigen Stromlaufplan ist das dezentrale digitale Ausgangsmodul für den Pneumatikzylinder gekennzeichnet. Für die sichere Durchführung trennt der IH das Ausgangsmodul von der Lastspannungsversorgung ab. Aufgrund der Annahme, dass die Dokumentation konsistent ist und keine Lastspannung auf dem Wegeventil bei der Sichtprüfung anliegt, fängt der IH mit seinen Arbeiten an.

Der IH berührt während seiner Tätigkeit den optischen Belegungssensor worauf der eigentlich deaktivierte Pneumatikzylinder dennoch ausfährt. Glücklicherweise war es doch nur das Werkzeug des IH und nicht seine Hand, die den Sensor ausgelöst hat und vom Zylinder erfasst wurde. Eine anschließende Untersuchung hat ergeben, dass das Ausgangssignal für den betroffenen Zylinder nach Modifizierungen auf ein anderes Ausgangsmodul gelegt wurde. Damit

³ technologisch nicht notwendige addierte Arbeitszeit während einer Instandhaltungsmaßnahme, in der kein technologischer Arbeitsfortschritt erreicht wird (REFA) [15]

wurde im Zuge der W&I-Arbeiten das falsche Modul von der Lastversorgungsspannung freigeschaltet. Diese kleine aber wichtige Änderung wurde nicht in dem Stromlaufplan dokumentiert, der dem IH vorlag, dieser ging jedoch von der Konsistenz der Dokumentation aus. Ein derartiges realitätsnahe Beispiel verdeutlicht, wie wichtig die Konsistenz einer TD auch nach der Inbetriebnahme für die Mitarbeiter des Betreibers ist und zeigt damit die folgende Herausforderung auf.

HF_3: Nach der Inbetriebnahme eines PS steigt die Wahrscheinlichkeit einer Differenz zwischen der TD und dem physischen Ist-Zustand des PS mit zunehmender Betriebsdauer an. Die Konsistenz der TD ist nicht mehr zwangsweise gewährleistet.

1.2 Fehlerursachen und -hierarchien in der Produktionssystemwartung und -instandhaltung

Eine weitere Herausforderung in der W&I ist die zunehmende Komplexität und Modularität von PS. Tritt ein Fehler auf, so muss dieser nicht zwangsweise im System aufgetreten sein, das den Fehler meldet. Durch Interkonnektivität und Wirkzusammenhänge zwischen Systemen, können Fehlerketten entstehen. Das heißt die primäre Ursache des Fehlers liegt in einem anderen System(teil) als das, das den Fehler gemeldet hat. Die Betriebsanleitung des PS benennt jedoch nicht unbedingt die Fehler der verbauten Systeme, sondern lediglich die Fehler, die durch die Zusammenschaltung der Systemelemente auf Maschinenebene auftreten können. Dabei können sich sowohl baulich zusammenhängende als auch baulich voneinander getrennte Systemelemente gegenseitig beeinflussen. Jede Ebene leitet somit seine Fehler aus den Fehlerfolgen eines Systemelements untergeordneter oder gleicher Ebenen einer Produktionssystemstruktur ab [16]. Die Fehler der Systemelemente sowie deren Auswirkungen und Ursachen sind dabei in den zugehörigen, meist PDF-basierten, Betriebsanleitungen der Systemelemente beschrieben, wie es die DIN EN IEC/IEEE 82079 [17] vorschreibt. Die so entstehenden systemübergreifenden Fehlerketten in einem PS und deren Dokumentation, z. B. mithilfe von Fehlerbäumen [18], sind jedoch nicht immer in der TD enthalten, da es für die TD eines PS nach dem DIN Fachbericht 146 [5] keine entsprechende Norm gibt. Vielmehr wird laut [5] empfohlen, die TD an der DIN EN IEC/IEEE 82079 [17] auszurichten und zusammen mit dem Produktionssystembetreiber die Inhalte der TD im Lastenheft abzustimmen [7].

Die Herausforderungen die entstehen, wenn diese Fehlerketten nicht in der TD enthalten sind, werden in nachfolgendem Beispiel-Szenario einer Störung an einer pneumatischen Baugruppe erläutert. Die Baugruppe besteht aus einem pneumatischen Linearantrieb, der einen horizontal verfahrenden Schlitten antreibt. Der Zylinder des Linearantriebs meldet im Bedienpanel den Fehler, dass die hintere Endlage nicht erreicht wurde, obwohl der Bediener bereits versucht hat,

diese im Handbetrieb anzufahren. Der Bediener hat sich bereits mit der Betriebsanleitung des PS befasst und im Abschnitt für die Instandhaltung exakt diesen Fehler gefunden. Zur Behebung des Fehlers wird empfohlen, die Endlagensensoren sowie die Stellung und Freigängigkeit des Zylinders zu überprüfen. Nach Zutrittsanforderung zu dem betroffenen Systembereich und der sicheren Freigabe dieses Bereichs, hat der Bediener diese drei Möglichkeiten überprüft, jedoch keine Fehlerursache detektiert. Nun muss der IH sowohl den pneumatischen Fluidplan als auch den Stromlaufplan analysieren. Mit Hilfe dieser Pläne findet er heraus, von wo aus der Zylinder pneumatisch versorgt und elektrisch angesteuert wird. Daraufhin kann er wiederum von diesen relevanten Systemelementen die Betriebsanleitungen zur Suche der Fehlerursachen heranziehen. Nachdem auch hier die Fehlerursache nicht gefunden wurde, können noch die Zusammenhänge zu den baulich getrennten Systemelementen in Betracht gezogen werden. Der IH sucht nun im Steuerungsprogramm der Maschine nach der Ansteuerung des Pneumatikzylinders und erkennt, dass einer der Roboter nicht in seiner Grundstellung steht und somit die Freigabe für die Baugruppe blockiert. Grund dafür waren manuelle Positionierarbeiten des Bedieners. Diese Informationen können aufgrund ihres Umfangs und der Komplexität nicht alle in der Betriebsanleitung eines PS untergebracht werden. Anhand des realitätsnahen Beispiels ist jedoch zu sehen, wie wichtig diese Zusammenhänge für den Umgang mit dem PS sind. Daraus kann die nächste Herausforderung abgeleitet werden.

HF_4: Beziehungen, Querverweise und Zusammenhänge zwischen Systemelementen, die in separaten Artefakten in der TD abgelegt sind müssen vom IH in manueller Analyse und parallel zur eigentlichen W&I-Tätigkeit identifiziert werden.

Ein letztes Beispiel soll auf die Gefahren und Hinweise im Umgang mit PS eingehen, die in den jeweiligen Betriebsanleitungen dokumentiert sind. Diese gilt es abgestimmt auf die Art der Tätigkeit (Installation, Inbetriebnahme, Wartung, etc.) an einem PS zu beachten. Die Gefahren, die auf einen Mitarbeiter wirken können, werden durch wiederkehrende Unterweisungen nach §12 Arbeitsschutzgesetz vermittelt. Die Hinweise in Betriebsanleitungen hingegen zielen meist auf den sachgemäßen Umgang mit einem PS oder den darin verbauten Systemelementen mit dem Ziel ab, diese nicht zu beschädigen. Der IH betreut jedoch mehrere PS und muss an einem Arbeitstag zwischen diesen wechseln, sodass er sich nicht jede Gefahr und jeden Hinweis aus den Betriebsanleitungen merken kann. Dennoch wird bei einem Stillstand des PS ein möglichst effizientes und schnelles Handeln des IH vorausgesetzt. Zum einen kann der IH in diesem Zusammenhang Unfallrisiken ausgesetzt sein und zum anderen kann er durch falsche Handlungen die Maschine oder deren Systemelemente beschädigen. Daraus lässt sich folgende Herausforderung aufzeigen.

HF_5: Der IH muss verschiedene Gefahren im Umgang mit dem PS sowie Hinweise für dessen bestimmungsgemäßen Betrieb inklusive aller Systemelemente beachten.

Die genannten Beispiele haben sich auf die W&I bezogen. Genauso können aber auch Beispiele während des Transports und Aufbaus eines PS, dessen Inbetriebnahme und Betrieb sowie dem späteren Rückbau der Anlage benannt werden. Zu allen diesen Phasen gibt es relevante Informationen, die in der TD eines PS festgehalten sind. Somit kann der Kreis der betroffenen Personengruppe auf alle Mitarbeiter erweitert werden, die mit dem Beginn der Errichtung eines PS mit diesem in Kontakt kommen. Aufgrund der umfassenden Komplexität welche, wie in den Beispielen aufgezeigt, allein die W&I darstellt, fokussiert sich diese Arbeit in der Lösungskonzeption zunächst auf die Mitarbeiter der W&I.

1.3 Abgeleitete Anforderungen und Ziele

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Herausforderungen **HF_1 bis HF_5** für die Mitarbeiter der Wartung und Instandhaltung im Umgang mit PS herausgearbeitet. Aus diesen HF werden im Folgenden Anforderungen abgeleitet. Welche Anforderungen bereits durch bestehende Arbeiten gelöst werden können, wird in Abschnitt 2 beschrieben.

Abgeleitete Anforderung (AF) basierend auf HF_1: Die TD liegt nicht oder nur teilweise maschineninterpretierbar vor und ist auf die Interpretation von Texten und Plänen durch den Menschen fokussiert.

- AF 1.1:** Für jedes Artefakt aus der technischen Dokumentation muss ein maschineninterpretierbares Informationsmodell vorliegen.
- AF 1.2:** Die Modelle für Artefakte sollen, wo möglich und sinnvoll, bestehenden Standards folgen.
- AF 1.3:** Die Modelle für Artefakte müssen semantische Definitionen zulassen bzw. bereits beinhalten oder darauf verweisen.
- AF 1.4:** Die maschineninterpretierbare TD (mTD) muss mit fortschreitendem Produktlebenszyklus flexibel mit Informationen sowie evtl. Partialmodellen ergänzt werden können.
- AF 1.5:** Die TD von bestehenden PS müssen schrittweise in die mTD überführt werden können.

Abgeleitete Anforderung (AF) basierend auf HF_2: Bestehende Normen stellen für die Verfälschungssicherheit von TD deren Archivierung in offenen standardisierten Formaten, wie beispielsweise TIFF, STEP oder PDF-A vor.

AF 2.1: Die mTD muss jederzeit in fälschungssichere, offene und standardisierte Formate transformierbar sein.

Abgeleitete Anforderung (AF) basierend auf HF_3: Nach der Inbetriebnahme eines PS steigt die Wahrscheinlichkeit einer Differenz zwischen der TD und dem physischen Ist-Zustand des PS mit zunehmender Betriebsdauer an. Die Konsistenz der TD ist nicht mehr zwangsweise gewährleistet.

AF 3.1: Jedes Datum aus den Artefakten der mTD (AF 1.1) darf in seiner Gesamtheit nur einmalig vorliegen.

AF 3.2: Die Artefakte müssen in einer zentral gültigen Version gespeichert werden.

AF 3.3: Es müssen Automatismen zur Aktualisierung einzelner Artefakte aus der mTD (AF 1.1) vorhanden sein.

AF 3.4: Es müssen Automatismen zur Aktualisierung der Beziehungen (AF 4.1) zwischen den Informationen einzelner Artefakte der mTD (AF 1.1) vorhanden sein.

AF 3.5: Die Aktualisierung der mTD (AF 1.1) muss automatisiert erfolgen.

AF 3.6: Für nicht digital erfassbare Änderungen braucht es Konzepte zur Aktualisierung der mTD (AF 1.1).

Abgeleitete Anforderung (AF) basierend auf HF_4: Beziehungen, Querverweise und Zusammenhänge zwischen Systemelementen, die in separaten Artefakten in der TD abgelegt sind müssen vom IH in manueller Analyse und parallel zur eigentlichen W&I-Tätigkeit identifiziert werden.

AF 4.1: Die Beziehungen zwischen Informationen aus unterschiedlichen Artefakten der mTD (AF 1.1) müssen formalisiert werden.

AF 4.2: Die Beziehungen müssen semantisch interpretierbar sein.

AF 4.3: Für bestehende PS müssen Automatismen zur Identifizierung und anschließenden Modellierung von Beziehungen vorhanden sein.

AF 4.4: Die für eine Tätigkeit relevanten Informationen müssen durch Automatismen extrahiert werden.

AF 4.5: Die für eine Tätigkeit extrahierten Informationen müssen sowohl für erfahrene als auch weniger erfahrene Mitarbeiter bedienerfreundlich dargestellt werden.

Abgeleitete Anforderung (AF) basierend auf HF 5: Der IH muss verschiedene Gefahren im Umgang mit dem PS sowie Hinweise für dessen bestimmungsgemäßen Betrieb inklusive aller Systemelemente beachten.

AF 5.1: Die Gefahren für die Ebene des betrachteten Systemelements müssen während der Tätigkeit des Mitarbeiters aus der mTD (AF 1.1) extrahiert und angezeigt werden.

AF 5.2: Hinweise müssen abgestimmt auf die Tätigkeit des Mitarbeiters und dem betroffenen Systemelement aus der mTD (AF 1.1) extrahiert und angezeigt werden.

Als Randbedingung für die Lösungskonzeption wird im Rahmen dieser Arbeit die Erfüllung der **AF 1.1. bis 1.4** vorausgesetzt. Dies wird von den Autoren anhand der Entwicklungen anderer Engineering-Domänen bzw. Lebenszyklusphasen und deren Einführung von standardisierten Informationsmodellen als durchaus valide betrachtet. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, Konzepte für die semantische Verknüpfung nach den **AF 4.1 bis 4.3** zu erforschen. Mit den Konzepten für die semantischen Verknüpfungen soll ein Assistenzsystem (AS) entwickelt werden, dass die **AF 4.4, 5.1 und 5.2** erfüllt. Dabei sollen sowohl neue PS als auch bestehende PS (**AF 1.5**) in die Betrachtung einbezogen werden. Es werden Vorschläge für die Umsetzung der **AF 2.1** erarbeitet, die es in weiteren Forschungsarbeiten zu konkretisieren gilt. Ebenso ist die Aktualisierung der TD nach **AF 3.1 bis 3.6** sowie die visuelle Bereitstellung der Informationen nach **AF 4.5** nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2. Relevante Vorarbeiten

Der erste Schritt auf dem Weg zur konsistenten Bereitstellung von Artefakten wird bereits durch das Digital Data Chain Konsortium [19] gegangen. Unter Hinzunahme von Metamodellen wie AutomationML [20], Protokollen und Informationsmodellen wie OPC UA oder der Verwaltungsschale (VWS), oder Methoden wie Model Based Systems Engineering (MBSE) für Produktionsanlagen [21] ist der Weg zu einer vollkommen maschineninterpretierbaren TD bereits geebnet (**AF 1.1 bis 1.4 und 3.2**). In [1] und [10] ist ein erstes Konzept für die Nutzung von VWS im Lebenszyklus eines PS beschrieben. Darin werden vier Arten von VWS identifiziert. Die erste VWS-Art „Anlage“ enthält das funktionale Design (z. B. DEXPI) des PS. Aus dem funktionalen Design werden anschließend Rollen extrahiert und zusammen mit deren Merkmalen in jeweils einer VWS „Rolle“ gespeichert. Mit Hilfe der Rollen erfolgt die Auswahl eines Gerätetyps, der die Rolle erfüllt. Dieser Gerätetyp wird in der dritten gleichnamigen VWS „Gerätetyp“ gespeichert. Zuletzt erfolgt die Verknüpfung des Gerätetyps mit der Geräteinstanz, für das die vierte VWS „Geräteinstanz“ existiert. Dieser Ansatz bietet ein Grundgerüst für die maschineninterpretierbare Speicherung und Verknüpfung von Informationen aus der TD eines PS. Mit der Bereitstellung des DEXPI Modells als Detailmodell [9] in der VWS „Anlage“ für den Nutzer, kann dieser ein Systemelement aus dem DEXPI Modell auswählen und über die im Hintergrund verknüpften VWS „Rolle“, „Gerätetyp“ und „Geräteinstanz“ auf die gewünschte

Information zugreifen. Soll z. B. eine Geräteinstanz ersetzt werden und der Gerätetyp ist nicht mehr verfügbar, ermöglicht die Verknüpfung zur Rolle die notwendigen Anforderungen um einen neuen Gerätetyp herauszufinden. Wenn alle Informationen in den genannten VWS maschineninterpretierbar vorliegen würden, könnten noch mehr semantische Verbindungen hergestellt werden, die in den untersuchten Arbeiten noch nicht betrachtet wurden. Zudem kann durch die Verwendung von Ontologien, Linked Data oder dem Semantic Web Wissen semantisch modelliert und referenziert und damit **AF 3.1** erfüllt werden. Die Verwendung der genannten Modellierungssprachen zur Wissensmodellierung muss bei der Erfüllung der **AF 4.1 und 4.2** evaluiert werden. Forschungsprojekte wie APPsist [22], [23] zeigen die Relevanz von kontextsensitiven Assistenzsystemen (KAS) für die produzierende Industrie um eine effektivere W&I zu ermöglichen. Diese KAS sollen den Mitarbeitern aus der W&I die für eine Tätigkeit relevanten Informationen bereitstellen (**AF 4.4**). In APPsist wurden für die Wissengewinnung Experteninterviews geführt, die dann in Prozessbeschreibungen für einzelne Tätigkeiten resultierten. Die Nutzung der bereits vorhandenen TD wurde in den Arbeiten nicht explizit erwähnt. Zudem stellt APPsist den Mitarbeitern Dienste bereit, die ihnen eine kontextsensitive Weiterbildung ermöglichen sollen, die in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet werden. Daneben existieren mit [24], [25], [26], [27] weitere Arbeiten, die sich mit einer verbesserten visuellen Darstellung (**AF 4.5**) von wichtigen Informationen aus z. B. Betriebsanleitungen via Augmented Reality beschäftigen. Weitau weniger Arbeiten forschen an KAS mit dem Fokus auf einen sichereren Umgang (**AF 5.1 und AF 5.2**) mit Anlagen, wie [28] für Off-Shore Windkraftanlagen. Hierin werden Messwerte in dem PS erfasst, aus denen mögliche Gefahren für den IH abgeleitet und diesem aktiv mitgeteilt werden. Das Wissen über die bestehenden Gefahren wird dabei mit Hilfe einer Risikoanalyse gewonnen und in Ontologien modelliert. Die genannten Arbeiten beschäftigen sich überwiegend mit den präventiven und korrektriven Instandhaltungsmaßnahmen (IH-Maßnahmen) für Instandhaltungsobjekte (IH-Objekte), für welche die Arbeitsschritte zur Instandsetzung überwiegend bekannt sind, ob durch die Betriebsanleitung des IH-Objekts oder digital dokumentierten Erfahrungen des IH-Personals. Voraussetzungen für diese Arbeiten sind jedoch, dass das fehlerhafte oder zu wartende IH-Objekt bekannt ist und die notwendigen Informationen in z. B. dessen Betriebsanleitung vollständig beschrieben sind. Wie bereits in Abschnitt 1.1 erläutert, kann der Umfang der TD jedoch variieren. Zudem wird bei diesen Arbeiten eine konsistente TD vorausgesetzt. Um eine zusammengesetzte TD und deren Datenintegrität zu ermöglichen (**AF 3.3 bis AF 3.5**), beschreibt [14] eine erste Lösung. Diese Lösung sieht eine in drei Ebenen gegliederte Methode zur Umsetzung einer selbstorganisierenden TD vor. Hiermit können zu jedem Systemobjekt die dazugehörigen Artefakte gemäß der physischen Produktionssystemstruktur strukturiert und

aktuell gehalten werden. Der IH erhält einen entsprechenden Zugriff auf die Informationen, die er für seine Tätigkeit benötigt. Auf die Bereitstellung maschineninterpretierbarer technischer Dokumente sowie deren Querverbindungen wird in [14] nicht eingegangen. Die von den Autoren erstellte Gesamtanalyse des Stands von Wissenschaft und Technik, welche nicht vollumfänglich in diesem Beitrag dargestellt werden kann, belegt, dass die meisten Arbeiten auf die Datenintegrität und hinreichende Dokumentation einzelner Systemelemente aufbauen. In komplexen PS bestehen jedoch, wie in den Beispielen in Abschnitt 1 beschrieben, zusätzliche Querverbindungen zwischen Artefakten und Dokumenten verschiedener Systemebenen. Mit Hilfe dieser Querverbindungen muss relevantes Wissen für den Umgang mit PS gewonnen werden, was heute vermehrt durch den Menschen zeitaufwändig extrahiert wird. Erst die Bereitstellung einer maschineninterpretierbaren TD ermöglicht die Querverbindungen zwischen einzelnen Informationen. Damit wiederum kann zusätzliches Wissen über PS maschineninterpretierbar gewonnen und im Unternehmen weiterverwendet werden.

3. Konzeptentwicklung

3.1 Grundlegendes Benchmark-Praxisbeispiel

Für die Konzeptentwicklung wird eine bestehende explosionsgeschützte Produktionsanlage zur Herstellung von Prothesenlinern, die als Schutz zwischen Stumpf und Prothese dienen, herangezogen. Dazu wird ein Textil auf einen Produktkern in Form eines Stumpfs aufgezogen und in einem Tauchvorgang mit einem Copolymer beschichtet. Die Tauchvorgänge finden in zwei Zellen mit jeweils einem Tauchbehälter statt. In einem dazwischenliegenden robotergestützten Handling-Bereich werden durch den Anlagenführer Produktkerne zugeführt, die anschließend durch den Roboter in einen der beiden mit Copolymer gefüllten Tauchbehälter getaucht werden. Nach einem Tauchvorgang erkaltet das am Produktkern anhaftende Material und überstehende Reste werden mittels eines sogenannten Butzenschneiders in der jeweiligen Tauchzelle abgeschnitten. Das Beispiel wurde in ähnlicher Weise bereits in Abschnitt 1.1 erwähnt und soll hier nochmals detaillierter aufgegriffen werden, um das Zusammenspiel der **HF_1 bis HF_5** zu verdeutlichen. Dabei wird folgendes Szenario exemplarisch untersucht:

Mitten im Betrieb meldet die Anlage dem Anlagenführer den Fehler, dass in der rechten Tauchzelle das Einschalten der Hubsäule, die den Tauchdeckel des Tauchbehälters hebt und senkt, nicht möglich ist. Der Grund hierfür ist, dass der Butzenschlitten des Butzenschneiders, der durch einen pneumatischen Linearantrieb (PLA) verfahren wird, in der vorderen Endlage steht. Der Anlagenführer schaltet in den Handbetrieb und versucht über eine Funktionstaste des Bedienpanels den Butzenschlitten in die hintere Endlage zu fahren. Daran schließt sich eine weitere Fehlermeldung an, dass der Butzenschlitten die hintere Endlage nicht erreicht hat. Die

Produktion muss unterbrochen werden um die Fehlerursache zu finden. Mit der Zugangsanforderung für die rechte Tauchzelle wird diese für den sicheren Zugang vorbereitet, d. h. alle explosionsgefährdeten Gase werden abgesaugt. Laut Betriebsanleitung der Anlage dürfen jedoch keine Zündquellen durch die Mitarbeiter in die Anlage gelangen, um jede Gefahr einer Explosion auszuschließen (**HF_5**). Zudem müssen bei Arbeiten an den Baugruppen diese sicher vom Netz getrennt werden. Hat der Anlagenführer Zugriff auf den Butzenschlitten, schaut er zuerst nach den Fehlerursachen, die in der Betriebsanleitung der Anlage (aus der TD) dokumentiert sind (**HF_1**). Er überprüft die Endlagensensoren am PLA, sowie dessen Stellung und Freigängigkeit und kann keine Funktionsbeeinträchtigung feststellen. Somit muss der Fehler am PLA eine andere Ursache haben, oder der gemeldete Fehler ist ein Folgeausfall, zu dem es nun die primäre Ursache (Primärausfall) zu finden gilt. In der Betriebsanleitung der Anlage endet an dieser Stelle jedoch die Hilfe zur Fehleridentifizierung und der Anlagenführer ruft den IH zur Hilfe. Dieser muss nun selbst mit Hilfe der TD nach den möglichen Fehlerursachen suchen (**HF_4**), während die Anlage weiterhin stillsteht. Der IH nimmt sich zuerst die physischen (elektrischen und pneumatischen) Verbindungen vor, die mit dem PL in Kontakt stehen. Dafür steht ihm der Anlagenschaltplan zur Verfügung. Alle mit dem PL direkt und indirekt zusammenhängenden Systeme, die aus dem Schaltplan gelesen werden können, wurden in Abbildung 1 stark vereinfacht extrahiert. Durch farbliche Hintergründe werden die unterschiedlichen Standorte der Systemelemente in der Anlage deutlich. Für die pneumatische Sicht lässt sich aus dem Schaltplan herauslesen, dass das Ventil zur Ansteuerung des PLA auf einer Ventilinsel verbaut ist, die sich an der Verteilertafel der rechten Tauchzelle befindet. Die Druckluftversorgung dieser Ventilinsel erfolgt über eine vorgeschaltete Wartungseinheit, die sich auf derselben Verteilertafel befindet. Elektrisch gesehen wird die Steuerspannung für die Ventilinsel von einem Safety-Relais und die Wartungseinheit über digitale Ein- und Ausgänge freigegeben. Nun muss der IH systematisch herausfinden, welches mit dem PLA verbundene System die Fehlerursache ist. Für die Überprüfung der Ventilinsel und der Wartungseinheit kann er sich deren Betriebsanleitungen zur Hilfe nehmen. Darin sind mögliche Fehlerursachen für eine Fehlfunktion aufgeführt. Zudem ist aus der Betriebsanleitung der Ventilinsel ersichtlich, welches Anzeigeelement auf der Ventilinsel den Status der Steuerspannung übermittelt. Mit dieser Informationsbeschaffung steigt jedoch die Nebenzeitz. Zudem kann es sein, dass der Fehler nicht durch ein System verursacht wird, das in direkter physischer, sondern in logischer Verbindung mit dem PLA steht. Beispielsweise bestimmt der Roboter in einer bestimmten Position zwischen Handling-Bereich und Tauchzelle die Freigabe des Butzenschlittens.

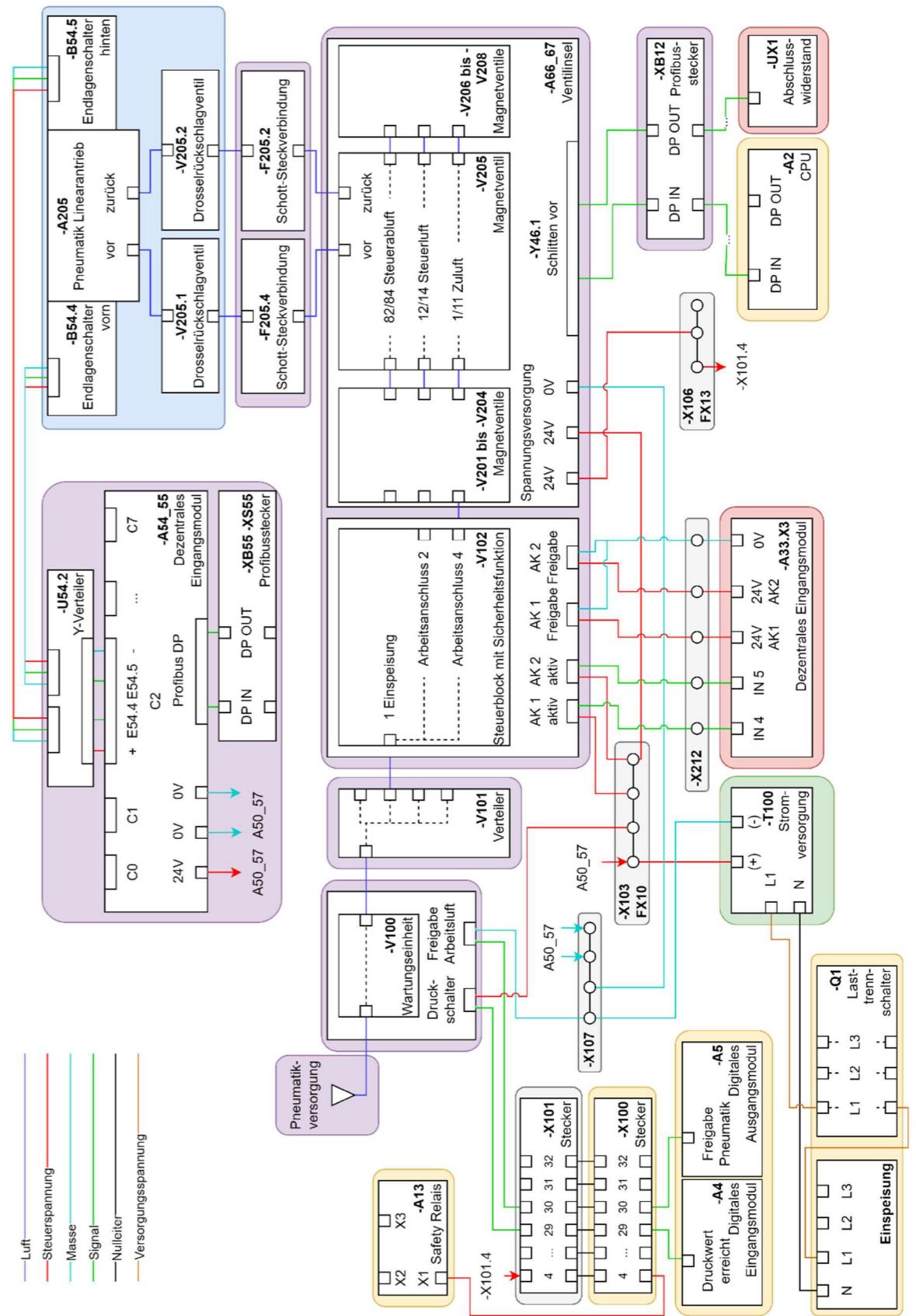


Abbildung 1: Elektrische und pneumatische Verbindungen des pneumatischen Linearantriebs

Würde der Prozess, als sich der Roboter an dieser Position befand, gestoppt und anschließende manuelle Handlungen durchgeführt und würde der Prozess danach wieder aufgenommen ohne alle geforderten Grundstellungsfahrten auszuführen, könnte es zu diesem Fehler kommen. Somit ergeben sich mehrere Fehlerursachen. Ist die Ursache gefunden und ein Wechsel des betroffenen Systems notwendig, muss die TD dahingehend aktualisiert werden (**HF 3**). Eine mit Hilfe der TD systematisch aufbereitete Übersicht der für die Tätigkeit relevanten Informationen, über die sowohl der Anlagenführer als auch der IH Kenntnis haben müssen, sind in Abbildung 2 gezeigt. Hierbei wurden die oben genannten Freigabesignale aus Abbildung 1, bis auf die Roboterposition, zunächst weggelassen.

Bereits in diesem übersichtlichen Szenario kann die Komplexität aufgezeigt werden, mit der sowohl die Entwickler eines PS als auch das spätere Bedien- und W&I-Personal konfrontiert sind. Das gezeigte Informationsnetz konnte durch die Verknüpfung von in der TD enthaltenen Artefakten gewonnen werden.

3.2 Konzeption eines Systemmodells für die technische Dokumentation

Wie in Abschnitt 1.3 benannt, wird das Vorliegen einer maschineninterpretierbaren TD nach **AF 1.1 bis AF 1.4** vorausgesetzt. Die Arten von Artefakten bilden gem. IEC 61355 [8] ein weites Feld. Deshalb wird von den Autoren ein methodisches Vorgehen gewählt, das iterativ zum endgültigen Konzept einer semantischen Verknüpfung von Informationsmodellen führt und in einem Systemmodell für die TD resultiert.

Das Vorgehen ist folgendermaßen gegliedert:

1. Auswahl eines Artefakts aus der TD.
2. Recherche nach einem Vorgehensmodell, dass die Entstehung des Artefakts beschreibt.
3. Extraktion relevanter Merkmale und Merkmalsbeziehungen für das Artefakt mit Hilfe des Vorgehensmodells.
4. Semantische Definition der Merkmalsbeziehungen.
5. Einfügen der gewonnenen Informationen in ein übergreifendes Systemmodell, das die Zusammenhänge einer TD beschreibt.

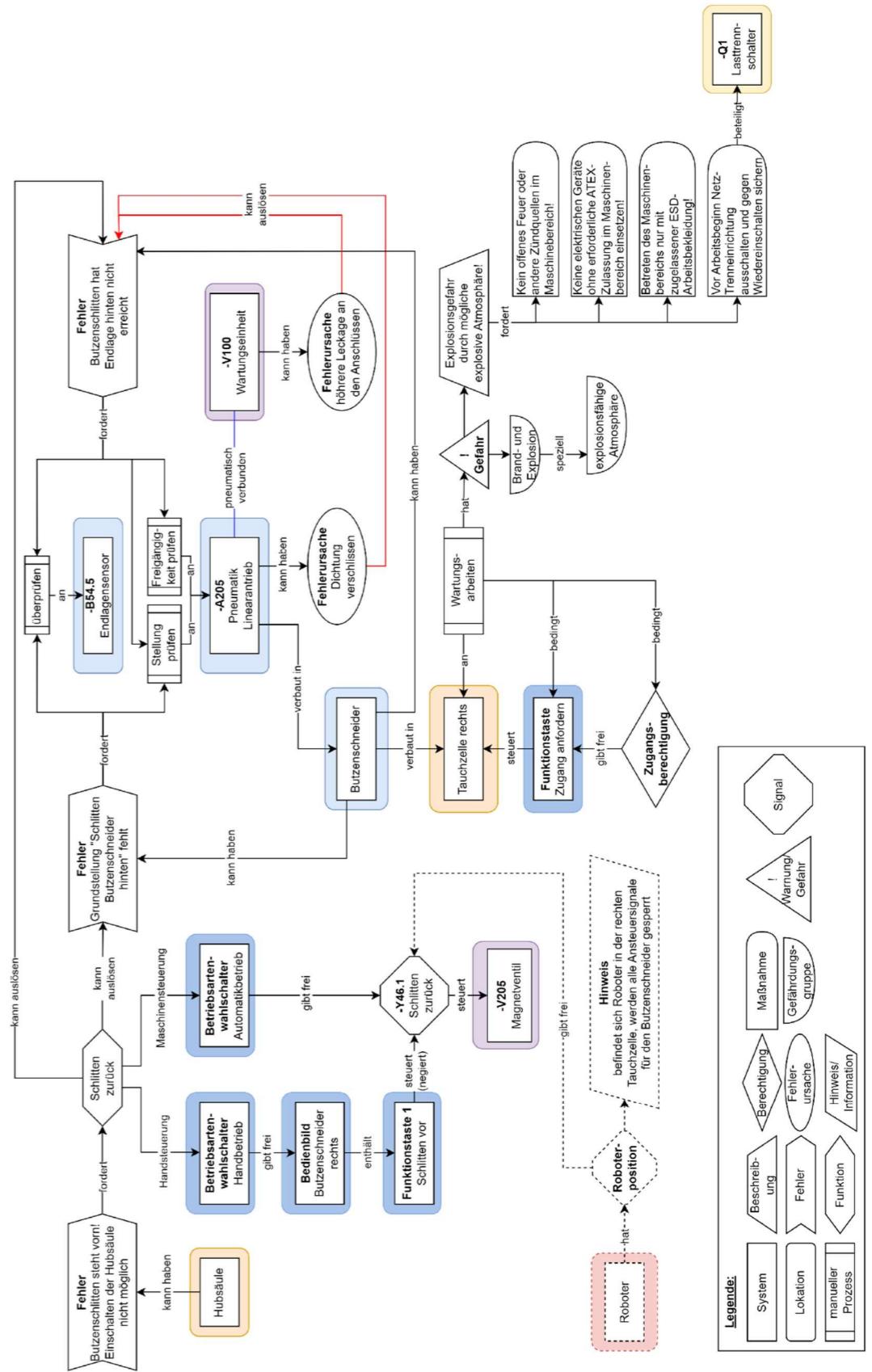


Abbildung 2: Informationsnetz im Zusammenhang mit dem pneumatischen Linearantrieb

Das in Punkt 5 entstehende Systemmodell beschreibt die generischen Zusammenhänge zwischen den Artefakten einer TD und deren Informationen. Das beschriebene Vorgehensmodell wurde bereits auf das in Abbildung 2 dargestellte Informationsnetz angewendet. Dabei wurden die Beziehungen und Entitäten, bezogen auf ein Systemelement, formalisiert. Das in Punkt 5 entstehende Systemmodell ist in Abbildung 3 dargestellt. Eine farbliche Hinterlegung der formalisierten Beziehungen und Entitäten dient der Gruppierung von Informationen in sogenannte Partialmodelle.

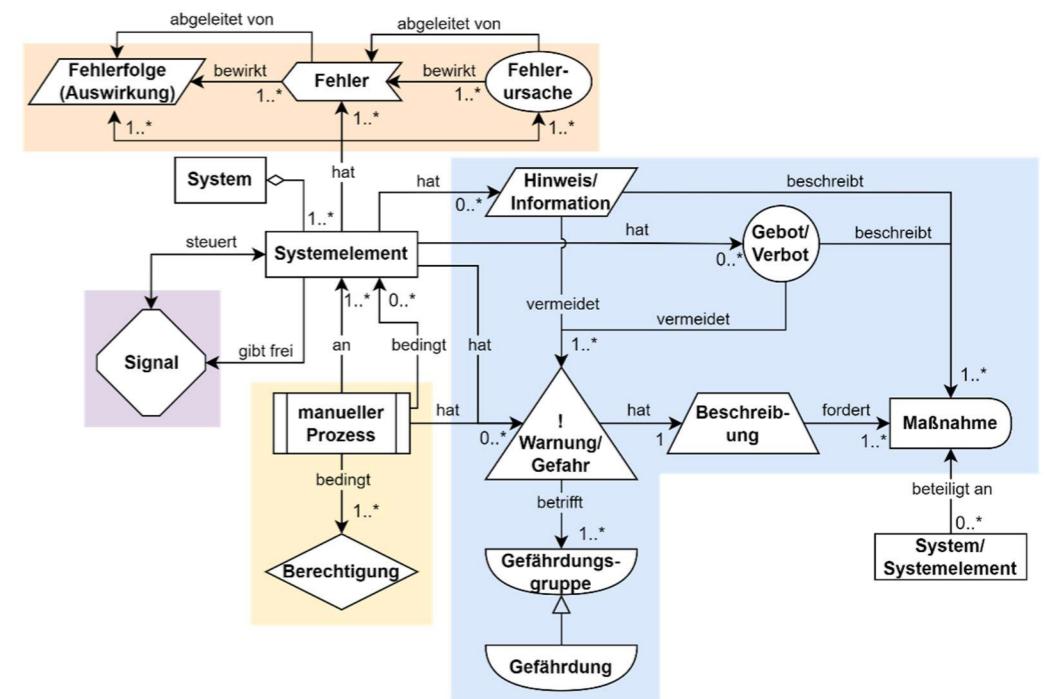


Abbildung 3: Erstes Konzept für ein 2D Systemmodell der technischen Dokumentation

Die 2D-Darstellung des Systemmodells zeigt bereits, dass zwischen den Partialmodellen Querbeziehungen bestehen, jedoch reicht die Ansicht nicht aus, um alle Querbeziehungen aufzuzeigen. Deshalb wurde ein 3D-Systemmodell erstellt (s. Abbildung 4), in dem die physische Produktionssystemstruktur einbezogen wurde. Dadurch kann gezeigt werden, dass Beziehungen nicht nur zwischen Systemen und Systemelementen bestehen, sondern auch zwischen ihren zugehörigen Informationen.

Das dargestellte Systemmodell dient als Ausgangspunkt für die weitere Konzeption und wird durch die wiederholte Ausführung der oben beschriebenen fünf Schritte sukzessive erweitert und verfeinert. Im auszugsweisen Systemmodell aus Abbildung 4 sind die Partialmodelle (PM) mit ihren Inhalten durch farblich hinterlegte Felder visuell voneinander getrennt:

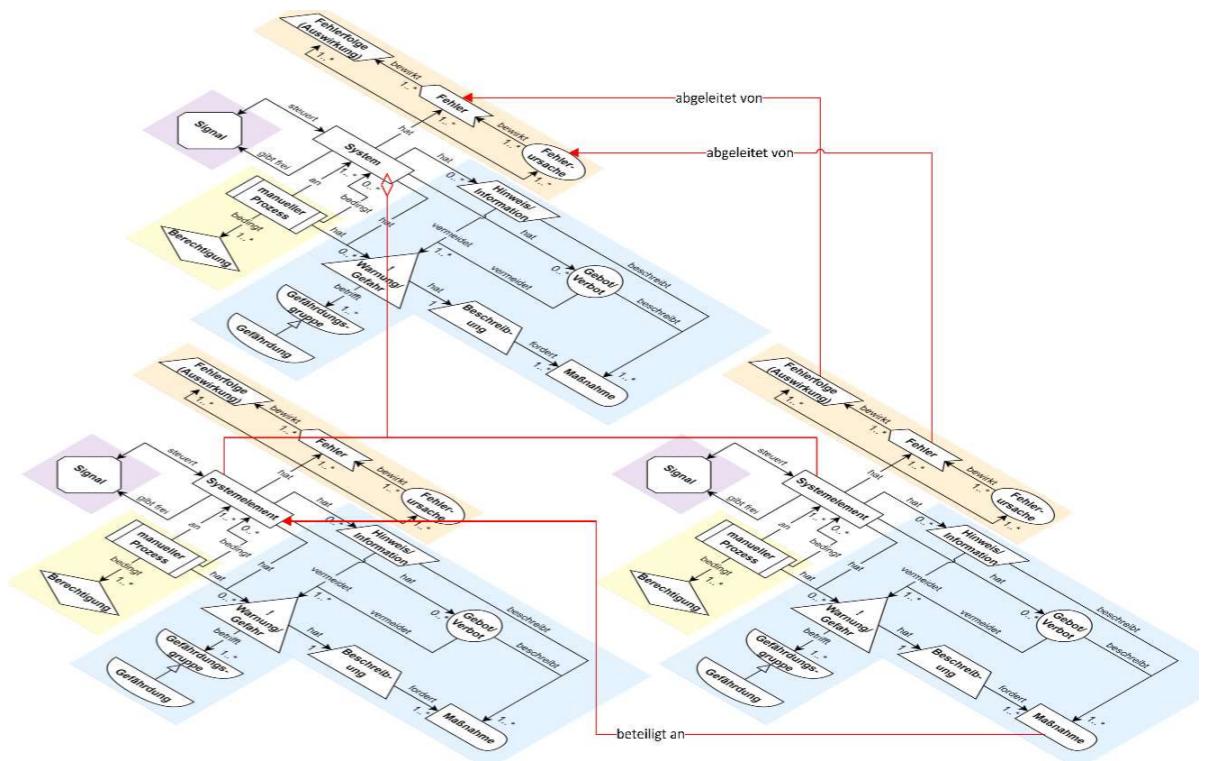


Abbildung 4: Erstes Konzept für ein 3D Systemmodell der technischen Dokumentation

- PM „Fehler“ (orange): Beschreibt die Fehler eines Systemelements mit dessen Ursachen und Auswirkungen. Hier gibt es sowohl Beziehungen, die intern im TM abgebildet werden können, aber auch nach außen führende Beziehungen, wie z. B. „abgeleitet von“. Diese Beziehung stellt beispielsweise den Zusammenhang zwischen einem Systemfehler und dessen Ursache dar, die wiederum aus einem Fehler eines untergeordneten Systemelements abgeleitet werden kann.
- PM „Risiken“ (blau): Beschreibt die Gefahren, Gebote, Hinweise sowie Maßnahmen die im Umgang mit einem Systemelement zu beachten sind. Bei den Maßnahmen können unter Umständen andere Systeme oder Systemelemente beteiligt sein.
- PM „Tätigkeiten“ (gelb): Beschreibt die manuellen Prozesse, die an einem System bzw. Systemelement durchgeführt werden können. Diese können in die Lebensphasen Montage, Installation, Inbetriebnahme, W&I, Abbau und Entsorgung gegliedert werden. Zudem beschreibt es die notwendigen Berechtigungen, um nur befugte Mitarbeiter mit der Aufgabe zu betrauen.
- PM „Signale“ (lila): Beschreibt sowohl die eigenen Signale eines Systems bzw. Systemelements, die für andere Systeme zur Verfügung gestellt werden als auch die

Beziehungen zu externen Signalen, die Einfluss auf das betrachtete System bzw. Systemelement haben.

Neben dem Systemmodell müssen mehrere Konzeptvarianten erarbeitet werden, welche die Instanziierung des Modells bezüglich des realen PS ermöglichen. Als eine mögliche Basis für das Systemmodell kann die VWS in Betracht gezogen werden. Die VWS beschreibt mit ihren Teilmodellen (TM) die Informationen eines Assets über dessen Lebenszyklus hinweg. Die Industrial Digital Twin Association (IDTA), die für die Spezifizierung der VWS und TM zuständig ist, hat bereits über 80 TM registriert. Hier gilt es zu prüfen, inwieweit bereits registrierte TM die Inhalte aus den vier oben beschriebenen Partialmodellen aufgreifen. Die genannten PM mit deren internen Beziehungen, werden nach **AF 1.1. bis 1.4** als vorausgesetzt gesehen. Für die Konzeptentwicklung sind die Beziehungen von den Merkmalen eines PM zu anderen PM-Merkmalen in einer VWS und zwischen diesen von Interesse. Aus der zunehmenden Komplexität des Systemmodells folgt eine zunehmende Menge an Beziehungen. Die Modellierung und Pflege dieser Beziehungen muss in den zu entwickelnden Konzeptvarianten beachtet werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus einer laufenden Forschungsarbeit, die sich mit der Wandlung der heute größtenteils starren TD in eine lebendige und semantisch verknüpfte TD für eine optimierte Bereitstellung von menschenzentrierten Informationen beschäftigt. Die Herausforderungen im Umgang mit der heutigen TD und deren Relevanz wurden anhand des Bereichs der Wartung- und Instandhaltung mit realistischen Beispielen belegt. Bestehende Arbeiten zeigen, wie Anwendern bereits heute durch die verbesserte Visualisierung menschenzentrierter Informationen aus einer TD ein assistierter Umgang mit einem Produktionssystem ermöglicht werden kann. Neben der Visualisierung spielt auch die Datenintegrität der technischen Dokumentation eine wichtige Rolle, für deren Sicherstellung bereits Methoden erforscht werden. Anhand eines konkreten Praxisbeispiels wurde detailliert gezeigt, wie wichtig die Querverbindungen, sowohl zwischen Informationen einzelner Artefakte als auch zwischen Systemen unterschiedlicher Ebenen sind. Zudem hat sich herausgestellt, dass die Nutzung von Informationen aus den Entwicklungsphasen eines Produktionssystems in nachfolgenden Phasen durch die dazwischengeschaltete Datentransformation in meist PDF-basierte Dokumente einen erhöhten Arbeitsaufwand im späteren operativen Betrieb mit sich führt. Um die aufgezeigten Herausforderungen zu bewältigen streben die Autoren an, die TD mehr im Kontext des modellbasierten Engineerings und Betriebs zu denken und diese zu einer lebendigen TD zu wandeln. Aufgrund der Komplexität einer TD wurden in diesem Beitrag nur

erste Aspekte beleuchtet, die den Weg zu einer lebendigen TD darstellen können. Aktuelle Arbeiten der Autoren sollen zeigen, wie das hier erstmals vorgestellte Systemmodell für die TD erzeugt werden kann. Mit Hilfe des daraus entstehenden Informationsnetzes soll ein Assistenzsystem die effektive Bereitstellung von bedarfsoorientierten Informationen ermöglichen.

5. Literatur

- [1] A. Schüller, D. Großmann, und M. Birkenkamp, „Informationsmodelle im Anlagenlebenszyklus“, *atp magazin*, Nr. 1-2/2022, S. 50–58, Februar 2022.
- [2] T. Tauchnitz, „Die Verwaltungsschale – Lösung für das Datenchaos!“, *atp magazin*, Nr. 6-7/2020, S. 50–59, Juli 2020.
- [3] A. Schüller, A. Modersohn, M. Kawohl, und J. Wrede, „Der Digitale Zwilling in der Prozessindustrie: Informationsmanagement als Grundlage der Digitalisierung | *atp magazin*“, *Atp Mag.*, Bd. 61(1–2), S. 70–81, 2019.
- [4] DIN, „DIN ISO 15226:2017-03 - Technische Produktdokumentation - Lebenszyklusmodell und Zuordnung von Dokumenten“. 2017.
- [5] DIN, „DIN Fachbericht 146:2006-01 - Technische Produktdokumentation - Betriebsanleitungen für Anlagen - Leitlinie für die Zusammenfassung von Informationen aus Betriebsanleitungen von Komponenten“. 2006.
- [6] K. Früh, D. Schaudel, L. Urbas, und T. Tauchnitz, *Handbuch der Prozessautomatisierung*, 6. Aufl. DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2018. Zugriffen: 5. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/buecher/311674/handbuch-der-prozessautomatisierung.html>
- [7] R. R. Cichowski, *Kenngrößen für die Automatisierungstechnik*, 3. Aufl., Bd. 101. in VDE-Schriftenreihe - Normen verständlich, vol. 101. Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH, 2018. Zugriffen: 8. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/buecher/404724/kenngroessen-fuer-die-automatisierungstechnik.html>
- [8] DIN, „DIN EN 61355-1 - 2009-03 - Klassifikation und Kennzeichnung von Dokumenten für Anlagen, Systeme und Ausrüstungen - Teil 1: Regeln und Tabellen zur Klassifikation“. 2009.
- [9] R. Drath *u. a.*, „Diskussionspapier – Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML - Zielbild und Handlungsempfehlungen für industrielle Interoperabilität“, Diskussionspapier, Apr. 2023.
- [10] T. Tauchnitz, F. Maurer, M. Barth, A. Schüller, und R. Drath, „Engineering mit der Verwaltungsschale - Teil 1: Zukunftsbild und Konzeption eines durchgehenden Informationsflusses am Beispiel des Engineerings von PLT-Einrichtungen“, *atp magazin*, Nr. 6-7/2024, Im Review zur Veröffentlichung 2024.
- [11] DIN, „DIN EN IEC 62714-1:2019-02 - Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 1: Architektur und allgemeine Festlegungen“. 2019.
- [12] DEXPI, „DEXPI P&ID Specification Version 1.3“. DEXPI Initiative, Juni 2021. Zugriffen: 3. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://dexpi.org/wp-content/uploads/2020/09/DEXPI-PID-Specification-1.3.pdf>
- [13] DIN, „DIN 6789:2013-10 - Dokumentationssystematik - Verfälschungssicherheit und Qualitätskriterien für die Freigabe digitaler Produktdaten“. 2013.

- [14] A. Barthelmey, D. Störkle, B. Kuhlenkötter, und J. Deuse, „Cyber Physical Systems for Life Cycle Continuous Technical Documentation of Manufacturing Facilities“, *Procedia CIRP*, Bd. 17, S. 207–211, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.01.050.
- [15] G.-W. Werner, *Instandhaltung am Beispiel stromführender Geräte und Anlagen*, 1. Aufl. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2023.
- [16] Automotive Industry Action Group, *AIAG & VDA FMEA-Handbuch*. Southfield: AIAG, 2019. Zugriffen: 8. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://webshop.vda.de/QMC/aiag-vda-fmea-handbuch>
- [17] DIN, „DIN EN IEC/IEEE 82079-1:2021-09 - Erstellung von Nutzungsinformationen (Gebrauchsanleitungen) für Produkte - Teil 1: Grundsätze und allgemeine Anforderungen“. 2021.
- [18] IEC, „IEC 61025:2006 - Fault tree analysis (FTA)“. 2006.
- [19] Fasihi, „Digital data chain“. Zugriffen: 11. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.digitaldatachain.com/portal/fep/de/dt.jsp?setCursor=1_211615
- [20] R. Drath, *AutomationML: Das Lehrbuch für Studium und Praxis*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2022. doi: doi:10.1515/9783110782998.
- [21] C. Bremer, „Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering“, Universität Paderborn, 2020. Zugriffen: 25. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/3436748>
- [22] C. Prinz, C. Ullrich, M. Aust, C. Igel, N. Breitkopf, und S. Schwantzer, „APPsist Statusbericht: Realisierung einer Plattform für Assistenz- und Wissensdienste für die Industrie 4.0.“, Aug. 2016.
- [23] C. Ullrich, A. Hauser-Ditz, N. Kreggenfeld, C. Prinz, und C. Igel, „Assistenz und Wissensvermittlung am Beispiel von Montage- und Instandhaltungstätigkeiten“, in *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung*, S. Wischmann und E. A. Hartmann, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, S. 107–122. doi: 10.1007/978-3-662-49266-6_8.
- [24] H. Flatt, N. Koch, C. Röcker, A. Günter, und J. Jasperneite, „A context-aware assistance system for maintenance applications in smart factories based on augmented reality and indoor localization“, in *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2015, S. 1–4. doi: 10.1109/ETFA.2015.7301586.
- [25] H. Dhiman und C. Röcker, „Worker Assistance in Smart Production Environments Using Pervasive Technologies“, in *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, März 2019, S. 95–100. doi: 10.1109/PERCOMW.2019.8730771.
- [26] R. Schlagowski, L. Merkel, und C. Meitinger, „Design of an assistant system for industrial maintenance tasks and implementation of a prototype using augmented reality“, in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Dez. 2017, S. 294–298. doi: 10.1109/IEEM.2017.8289899.
- [27] M. Gattullo, G. W. Scurati, M. Fiorentino, A. E. Uva, F. Ferrise, und M. Bordegoni, „Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology“, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, Bd. 56, S. 276–286, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2018.10.001.
- [28] N. Koppaetzky und D. Nicklas, „Towards a model-based approach for context-aware assistance systems in offshore operations“, in *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, März 2013, S. 55–60. doi: 10.1109/PerComW.2013.6529456.